

GESTÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM AMBIENTES INSULARES caso de estudo da ilha do Maio (Cabo Verde)

Alberto da Silva LIMA

Doutor em Hidrogeologia, Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos, Departamento de Ciências da Terra, Universidade do Minho, 4710-057 Braga, Portugal, aslima@dct.uminho.pt

Elizandra Maria O. GARCIA

Mestre em Ordenamento e Valorização de Recursos Geológicos, Cabo Verde, + 2389953637, elizourico@hotmail.com

RESUMO

A gestão de águas subterrâneas em zonas costeiras assume particular relevância em ambientes insulares, devido a elevada proporção de terrenos adjacentes às massas de água oceânicas. Em ilhas planas, de reduzida dimensão e com clima árido ou semiárido, a problemática é ainda mais sensível, já que a escassa precipitação atmosférica e a elevada evapotranspiração potencial determinam reservas de água subterrânea muito limitadas. A estes aspectos de natureza climática, há que acrescentar a reduzida inclinação da interface água doce/água salgada e a conseqüente possibilidade de intrusão salina nas áreas costeiras. O presente estudo foi efectuado na ilha de Maio, a mais antiga e uma das mais planas ilhas do Arquipélago de Cabo Verde. Apresenta um comprimento máximo de 24,1 km e uma largura máxima de 16,3 km, ocupando uma área de, aproximadamente, 269 km². A maior parte da ilha apresenta cotas muito baixas, frequentemente inferiores a 100 m. Constitui exceção o maciço central, onde se erguem algumas elevações, culminando no Monte Penoso com uma altitude de 436 m. Em termos hidrogeológicos, o escoamento geral é do tipo centrífugo e processa-se segundo gradientes hidráulicos que, nas regiões litorais, podem assumir valores muito baixos, favorecendo a intrusão salina. Não obstante, as captações de água subterrânea localizam-se essencialmente nestas zonas e acusam indícios de salinização, particularmente no sector setentrional. Numa perspectiva de gestão de recursos hídricos, sugere-se a construção de captações no maciço central, onde se aliam critérios de quantidade e qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

Palavra-chave: Gestão, águas subterrâneas, ambientes insulares, Cabo Verde, Maio.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o recurso natural água vem sendo cada vez mais disputado, tanto em quantidade quanto em qualidade, principalmente em consequência do acentuado crescimento demográfico e do próprio desenvolvimento económico.

As disponibilidades hídricas em regiões de climas áridos e semiáridos são extremamente limitadas. Esta situação assume ainda maior relevo em regiões insulares, devido à dificuldade de transferências hídricas. Nestes casos, o fornecimento de água às populações é uma tarefa extremamente delicada, havendo necessidade recorrente de racionalização de recursos.

A gestão de recursos hídricos implica um conhecimento o mais rigoroso possível das disponibilidades hídricas, quer no que respeita às águas superficiais, quer em termos de águas subterrâneas. A incerteza associada às estimativas dos recursos hídricos subterrâneos de uma região requer a adopção de metodologias diversificadas, de modo a produzir valores coerentes, os quais estão na base das estratégias de planeamento. Em terrenos cristalinos, são acrescidas as dificuldades em obter estimativas consensuais que constituam um suporte efetivo da atividade de gestão dos recursos hídricos. No caso das águas subterrâneas, para além da avaliação das disponibilidades hídricas e de modo a garantir a sustentabilidade dos recursos, é necessário ainda conceptualizar o funcionamento dos sistemas hidrogeológicos, de modo a produzir um suporte em torno do qual se desenvolvem os modelos matemáticos que deverão governar a gestão dos aquíferos.

O conhecimento, ainda que incipiente, da hidrogeologia de Cabo Verde vem demonstrar as características peculiares dos meios vulcânicos, nomeadamente a sua heterogeneidade e anisotropia. Simultaneamente, para além dos aspectos geológicos, as características climáticas regionais, áridas a semiáridas, concorrem para a existência de recursos hídricos muito limitados, cujo aproveitamento terá de ser feito num quadro de gestão integrada, incluindo as águas subterrâneas, as águas superficiais, a dessalinização da água do mar e a reutilização de águas residuais.

Trabalhos recentes sobre a ilha de Santiago (MOTA GOMES, 2007; PINA, 2009) puseram em evidência a limitada recarga aquífera e o risco de degradação dos recursos hídricos subterrâneos regionais, devido a fenómenos de intrusão salina e à contaminação agrícola. No entanto, o conhecimento hidrogeológico sobre as restantes ilhas do arquipélago é praticamente inexistente. Para além de inventários de pontos de água, não são conhecidos os recursos hídricos subterrâneos, quer do ponto de vista quantitativo, quer do ponto de vista qualitativo.

Com o presente trabalho pretende colmatar-se, ainda que parcialmente, aquela lacuna em relação à ilha do Maio. Para o efeito, foram desenvolvidos estudos que visaram a caracterização hidrogeológica da ilha, permitindo definir o papel das águas subterrâneas numa estratégia de gestão integrada dos recursos hídricos da ilha do Maio.

Para a realização deste trabalho recorreu-se, para além de uma revisão bibliográfica, à recolha de informação de natureza hidrometeorológica, efetuou-se um inventário de pontos de água e realizaram-se colheitas de amostras, tanto de precipitação como das águas subterrâneas, em pontos selecionados. Estas amostras foram submetidas a análises físico-químicas completas.

As metodologias adoptadas permitiram a avaliação dos recursos hídricos subterrâneos da ilha do Maio, nas suas vertentes quantitativa e qualitativa.

2. LOCALIZAÇÃO

O Arquipélago de Cabo Verde fica localizado na margem Oriental do Atlântico Norte, a cerca de 450 km da Costa Ocidental da África e a cerca de 1400 km a SSW das ilhas Canárias (**Figura 1**) É limitado pelos paralelos 17° 13' (Ponta Cais dos Fortes, Ilha de St° Antão) e 14° 48' de latitude Norte

(Ponta de Nho Martinho, Ilha Brava) e pelos meridianos de $22^{\circ} 42'$ de longitude Oeste de Greenwich (ilhéu Baluarte, Ilha da Boa Vista) e $25^{\circ} 22'$ (Ponta Chã de Mangrado, Ilha de St^o Antão).

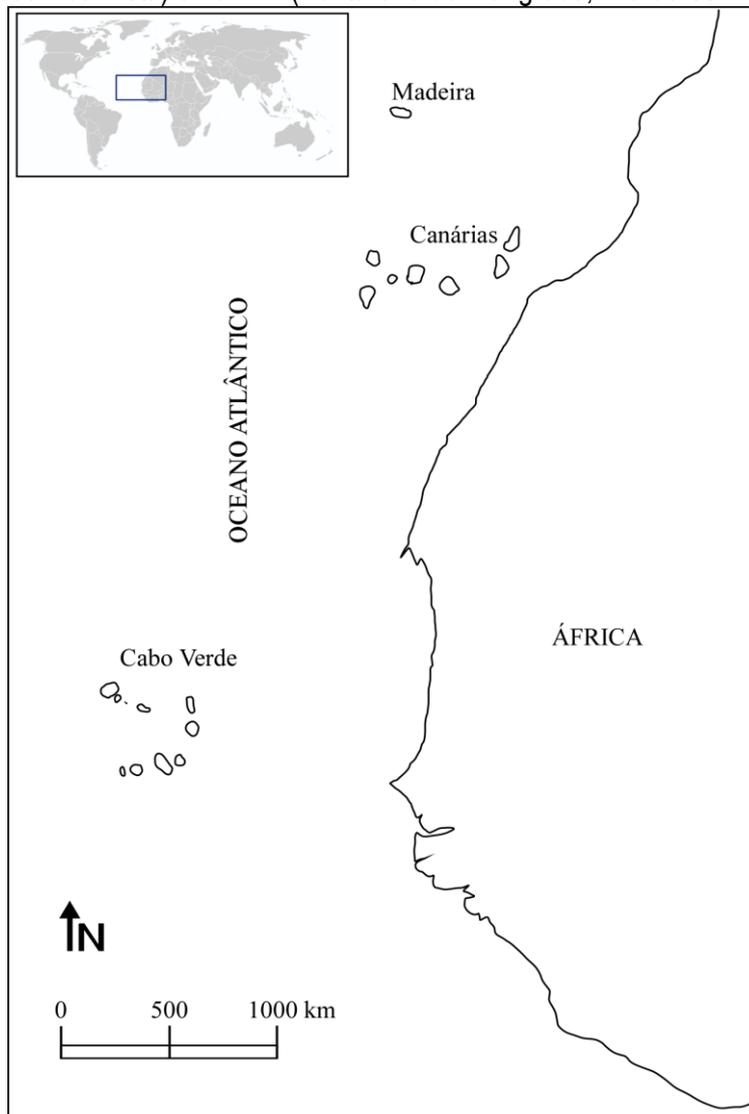


Figura 1 - Localização geográfica do Arquipélago de Cabo Verde.

O arquipélago de Cabo Verde é constituído por 15 ilhas e ilhéus distribuídos em forma de ferradura com abertura para ocidente. Em função dos ventos dominantes (os alísios do nordeste) é usual dividir o arquipélago de Cabo Verde em dois grupos: (i) Barlavento e (ii) Sotavento. O primeiro é constituído pelas ilhas de Santo Antão, São Vicente, Santa Luzia, São Nicolau, Sal e Boa Vista. O grupo do Sotavento inclui, para além da ilha de Maio, as ilhas de Santiago, Fogo e Brava (Figura 2).

A Ilha de Maio situa-se a sul da ilha de Boa Vista, a 25 km a este de Santiago e desenvolve-se entre os paralelos $15^{\circ} 7'$ e $15^{\circ} 20'$ de latitude norte e entre os meridianos $23^{\circ} 5'$ e $23^{\circ} 15'$ de longitude oeste, com um comprimento máximo de 24100 m entre a ponta de Cais do Norte, a norte, e a ponta Jampala, a sul, e uma largura máxima de 16 300 m, entre a ponta Banconi, a este, e a ponta dos Flamengos, a oeste, sendo a superfície total de 269 km² (BEBIANO, 1932). O vértice geodésico do Monte Penoso assinala o ponto mais elevado da ilha onde se atinge uma altitude de 436 m.

A população da ilha de Maio tende a concentrar-se nas regiões litorais, onde desenvolve a sua principal atividade, que é a pesca. Para além desta atividade socioeconómica, a população da ilha do Maio dedica-se essencialmente à agricultura, embora a escassez de água e a sua salinização tenham levado ao abandono de muitos terrenos agrícolas.

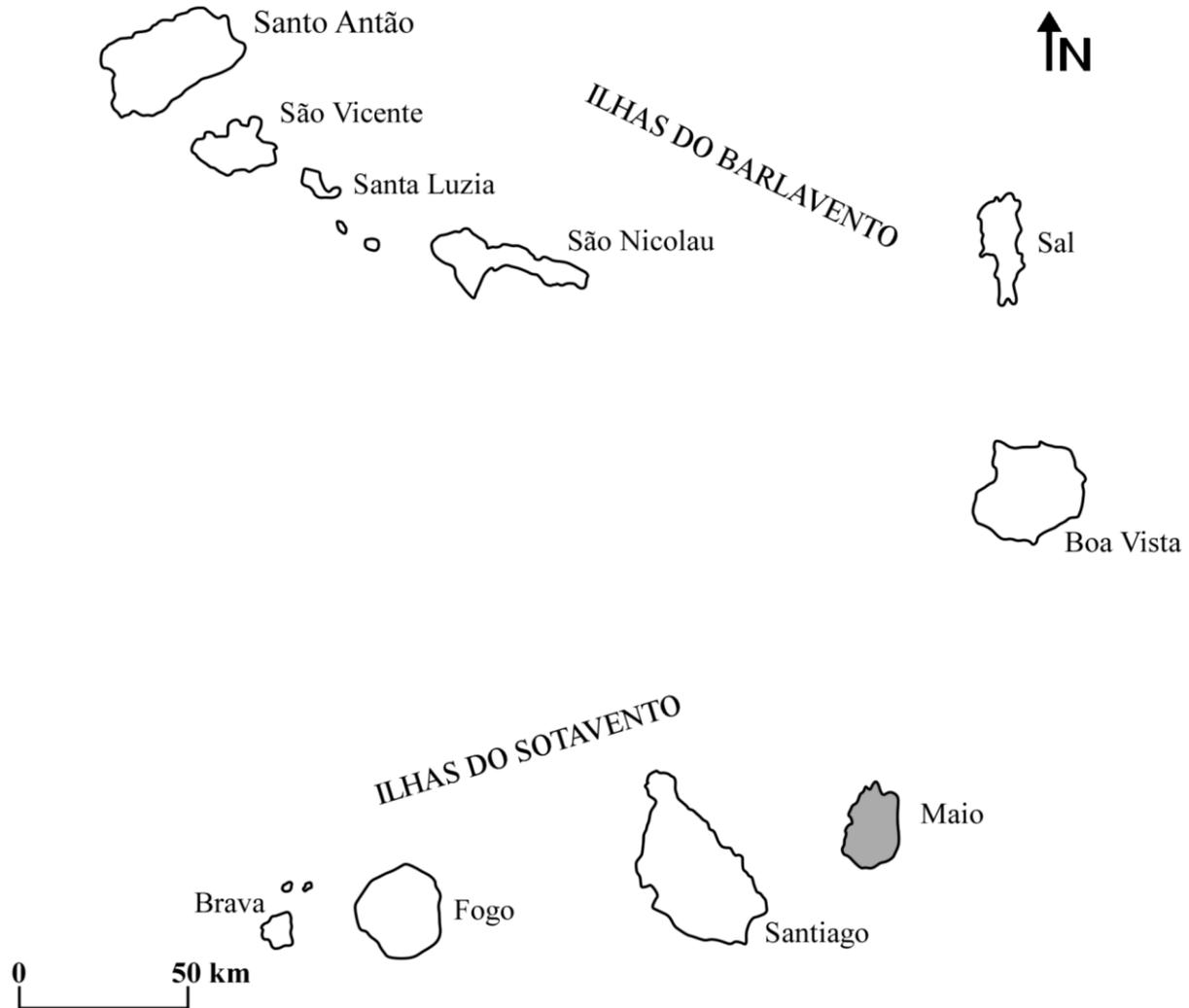


Figura 2 - Distribuição das ilhas e dos ilhéus que compõem o arquipélago de Cabo Verde, destacando-se a ilha de Maio.

3. CLIMA

Do ponto de vista climático, o Arquipélago de Cabo Verde fica situado numa vasta zona de clima árido e semi-árido, que atravessa a África desde o Atlântico ao Mar Vermelho e se prolonga pela Ásia. Esta faixa extensa fica compreendida entre os centros de altas pressões subtropicais do Atlântico Norte e a linha de Convergência Intertropical, no seio dos ventos alísios (AMARAL, 1964). À semelhança dos outros países sahelianos, Cabo Verde manifesta duas estações distintas: estação seca, de Dezembro a Junho e estação húmida, de Agosto a Outubro. Os meses de Julho e Novembro consideram-se de transição. O arquipélago, por vezes, é invadido por rajadas de vento quente e seco (Harmatão),

proveniente do deserto de Sahara, quando o anticiclone dos Açores se desloca mais a leste. Este vento sopra por poucas horas ou prolonga-se por vários dias. Apesar do percurso marítimo de algumas centenas de quilómetros, chega às ilhas ainda quente e seco. Para além do Harmatão, o clima cabo-verdiano é condicionado por mais dois tipos de ventos, de origem e características diferentes: o Alísio do nordeste e a Monção do Atlântico Sul (AMARAL, 1964).

As precipitações no arquipélago são na generalidade fracas, com valores médios que não ultrapassam 300 mm para as zonas situadas abaixo de 400 m de altitude e 700 mm para as zonas situadas a mais de 500 m de altitude e expostas aos ventos alísios (INGRH, 2000). Contudo, as ilhas mais aplanadas podem registar precipitações anuais inferiores a 250 mm, sendo portanto enquadráveis no clima árido. A precipitação média anual na ilha de Maio é de 125,4 mm, mas apresenta uma elevada variabilidade interanual, ocorrendo anos secos e muito secos com bastante frequência. De um modo geral, a precipitação está concentrada nos meses de Agosto, Setembro e Outubro; pelo contrário, no período de Dezembro a Junho, a precipitação é praticamente nula. Os meses de Julho e Novembro registam alguma precipitação, podendo ser considerados meses de transição (GARCIA, 2010).

A temperatura média da ilha de Maio varia entre 22,4 °C, nos meses de Fevereiro e Março, e 27,4 °C no mês de Setembro. A temperatura mínima foi registada no mês de Março (15,7 °C) e a máxima de 32,2 °C no mês de Outubro.

Da integração dos valores médios de precipitação e temperatura mensais, verifica-se que a temperatura máxima é registada no mês de Setembro, que é também o mês de maior precipitação. Nestas condições, quase todo o ano é considerado período seco, com exceção do mês de Setembro (Figura 3). A evapotranspiração potencial é de 1564,8 mm, o que limita a evapotranspiração efetiva ao valor da precipitação. No entanto, não é esta situação que ocorre, uma vez que os eventos pluviosos estão muito concentrados no tempo.

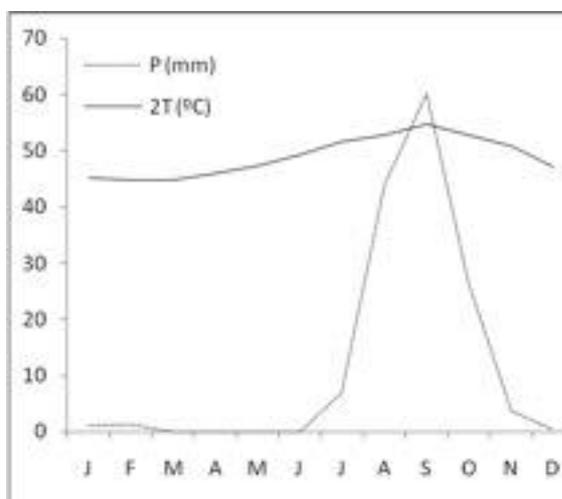


Figura 3 – Diagrama termopluviométrico da estação de Calheta/Monte Vermelho.

Considerando os valores médios dos parâmetros climáticos antes referidos, o clima da ilha de Maio pode ser classificado, no sistema de Köppen, como um clima do tipo *BWh*, ou seja, um clima seco, árido, com uma temperatura média anual superior a 18 °C (STRAHLER e STRAHLER, 1989).

4. GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

De acordo com BEBIANO (1932), as várias erupções vulcânicas que deram origem às ilhas de Cabo Verde tiveram início no fundo do oceano e, em alguns casos, os produtos vulcânicos levaram até à superfície fragmentos da litosfera. As ilhas de Sal, Boa Vista e Maio são consideradas as mais antigas, pelo que, estas ilhas não possuem atualmente qualquer vestígio das crateras principais.

Segundo BURKE e WILSON (1972), a génese das ilhas está associada a um mecanismo do tipo *hotspot*. Do mesmo modo, CROUGH (1978) considera que o Arquipélago é o resultado de um *hotspot* desenvolvido a partir de plumas mantélicas. Mais recentemente, ALI *et al.* (2003) e PIM *et al.* (2008) consideram que o mecanismo de *hotspot* não consegue explicar completamente a origem destas ilhas. Segundo estes autores, processos magmáticos profundos, nomeadamente o levantamento dinâmico, seriam os responsáveis pela formação das ilhas do Arquipélago.

O modelo de STILLMAN *et al.* (1982) prevê que a formação da ilha do Maio tenha ocorrido sobre ou nas proximidades da crista média oceânica, sendo as rochas da Formação do Monte Batalha as mais antigas da ilha (Jurássico Superior). No final do Jurássico o vulcanismo submarino cessou, tendo-se iniciado a sedimentação que veio a dar origem à sedimentação de calcários pelágicos da Formação do Morro. Durante esta deposição, o fundo oceânico não recebeu quantidades significativas de sedimentos terrestres e manteve-se tectonicamente estável. No final do Cretácico inferior (Albiano) reiniciou-se o vulcanismo, tendo a ilha emergido, expondo o edifício vulcânico aos fenómenos de erosão. Esta emergência está também associada ao levantamento decorrente da instalação de plutões, provavelmente alimentados por uma fonte local de magma. Esta intrusão não pode ser anterior ao Aptiano. Apesar da deposição ter continuado até ao Cretácico superior, não são conhecidos sedimentos Paleogénicos na ilha do Maio, devido provavelmente à erosão e/ou à ausência de deposição. No Neogénico foi retomada a atividade vulcânica, dando origem à Formação de Casas Velhas (ancaramitos), que veio a ser erodida, dando origem à Formação do Pedro Vaz (conglomerados). O vulcanismo Neogénico subsequente teve lugar em, pelo menos, duas fases. A primeira originou a Formação de Pedra Malhada e a segunda deu origem à Formação do Monte Penoso. A partir de então, a ilha tem sido erodida, parcialmente aplanada e recoberta por diversas gerações de depósitos Quaternários.

De acordo com FARIA (1987), a geomorfologia da ilha de Maio caracteriza-se essencialmente pela existência de muitas planuras, principalmente nas partes norte e ocidental. Essas planuras são estruturalmente de dois tipos diferentes. Uma são chamadas de planuras ou achadas do litoral e as outras, chamadas planuras ou achadas do interior, encontram-se no interior da ilha. A regularidade das planuras do interior é muito inferior à das planuras do litoral, porque as primeiras foram originadas pela ação fluvial, enquanto as segundas resultaram de erosão marinha.

Segundo BEBIANO (1932), o maciço central é o elemento orográfico dominante da ilha de Maio. Dele ergue-se uma série de montes situados entre as aldeias do Morro, Pilão Cão e Pedro Vaz. Na parte norte, entre as aldeias de Santo António e Cascabulho, encontram-se montes separados por planuras do interior. Os relevos constituem ramos, formando uma cordilheira ligada ao monte Penoso, o mais alto da ilha, com 436 m de altitude. Linhas de água desenvolvidas e ramificadas partem deste maciço central e de outras elevações, mas possuem água apenas na época das chuvas.

Em duas planuras litorais evidenciam-se extensas zonas de terrenos salgados, onde o mar penetra, alimentando regularmente as salinas.

As depressões resultam essencialmente da ação da chuva e do vento. Entre o Monte Forte e duas pequenas elevações (Monte Esgrovere e Monte Calixa) situa-se a maior depressão da ilha. Trata-se da Ribeira da Lagoa, resultante da erosão pluvial. Existem ainda pequenas depressões, como a

Ribeira de Pai Joana, Ribeira das Casas Velhas, Ribeira do Morro, Ribeira Preta e outras. Os vales são pouco profundos, em nítido contraste com as ilhas montanhosas.

5. HIDROGEOLOGIA

5.1 Unidades hidrogeológicas

BURGEAP (1974) apresenta um esquema hidrogeológico geral para o Arquipélago de Cabo Verde constituído por três grandes unidades: (i) unidade de base, (ii) unidade intermédia e (iii) unidade recente.

A Unidade de Base é constituída pelas formações mais antigas como é o caso do Complexo Eruptivo Interno Antigo (Ante – Miocénico Médio), da formação de mantos basálticos submarinos antigos (Miocénico Médio) e a Formação Conglomerático-Brechóide (Miocénico Médio). Estas formações apresentam globalmente uma permeabilidade reduzida, devido essencialmente ao elevado grau de alteração, que contribui também para a diminuição da capacidade de infiltração. Como tal, de um modo geral, esta unidade de base funciona essencialmente como uma barreira hidrogeológica, podendo o seu topo corresponder à base dos aquíferos subjacentes. No entanto, as formações da série de base podem apresentar características aquíferas. Aliás, na ilha de Maio, o Complexo Eruptivo Interno Antigo desempenha um papel hidrogeológico importante, por se encontrar bastante fracturado e pouco alterado (BURGEAP, 1974).

A Unidade Intermédia, essencialmente constituída pelo Complexo Eruptivo Principal (Miocénico – Pliocénico), caracteriza-se por ser a formação mais espessa e mais extensa na generalidade das ilhas de Cabo Verde. Estas características, aliadas à elevada capacidade de armazenamento e à permeabilidade reduzida, tornam esta unidade o principal aquífero do Arquipélago. Além disso, a recarga desta unidade é favorecida por dois processos. O primeiro prende-se com o facto de estas formações constituírem os principais relevos das diferentes ilhas, onde a precipitação é maior. O segundo aspecto está relacionado com a elevada permeabilidade das formações subjacentes, as quais, não tendo capacidade de reter água, cedem-na às formações subjacentes, ou seja, as que constituem a unidade intermédia.

A Unidade Recente é constituída por material piroclástico basáltico e derrames associados, com alto grau de permeabilidade e de porosidade relativamente elevada em relação às outras formações geológicas. Fazem parte desta unidade, a formação de cones vulcânicos (Pliocénico-Quaternário) e as formações sedimentares recentes. Trata-se de uma unidade altamente permeável, privilegiando desta forma a infiltração. No entanto, como se referiu anteriormente, não permite a retenção da água, o que faz com que a mesma seja drenada para níveis inferiores.

A série vulcânica antiga da ilha de Maio apresenta-se bastante fracturada e pouco alterada, o que lhe confere uma importância hidrogeológica acrescida. Além disso, a ilha de Maio é também a única que apresenta formações anteriores ao Complexo Eruptivo Interno Antigo. Por estas razões, apesar da exiguidade da precipitação, esta ilha apresenta peculiaridades hidrogeológicas que lhe conferem um estatuto privilegiado no contexto da hidrogeologia do Arquipélago de Cabo Verde.

Todas as formações geológicas da ilha de Maio são relativamente permeáveis, apresentando potenciais de produtividade que podem ultrapassar uma centena de metros cúbicos por dia. No entanto, é necessário considerar dois domínios distintos: o domínio sul e Este e o domínio noroeste. O primeiro, de menor permeabilidade, apresenta gradiente hidráulico elevado, limitando a invasão marinha às zonas baixas das principais ribeiras. O domínio noroeste, mais permeável, apresenta gradientes hidráulicos pouco acentuados, favorecendo a intrusão salina (BURGEAP, 1974).

5.2 Recursos hídricos

Os modelos do balanço hídrico ao nível do solo foram desenvolvidos para regiões húmidas e, como tal, têm menor validade em ambientes áridos e semiárido. Além disso, são mais eficazes em situações onde os solos não secam completamente e os valores de evapotranspiração potencial e real são semelhantes e, ainda em situações em que a precipitação tem uma distribuição relativamente uniforme ao longo do período em análise (LERNER *et al.*, 1990). Apesar das condições climáticas da ilha do Maio não se mostrarem favoráveis à aplicação desta metodologia, apresentam-se os resultados da aplicação de um modelo de balanço diário baseado na fórmula empírica do *Soil Conservation Service*, efectuada de forma semiautomática, com recurso a uma folha de cálculo desenvolvida por CANAS *et al.* (2003). Os dados de precipitação diária disponíveis referem-se ao ano de 2009. Os resultados são apresentados na Figura 4.

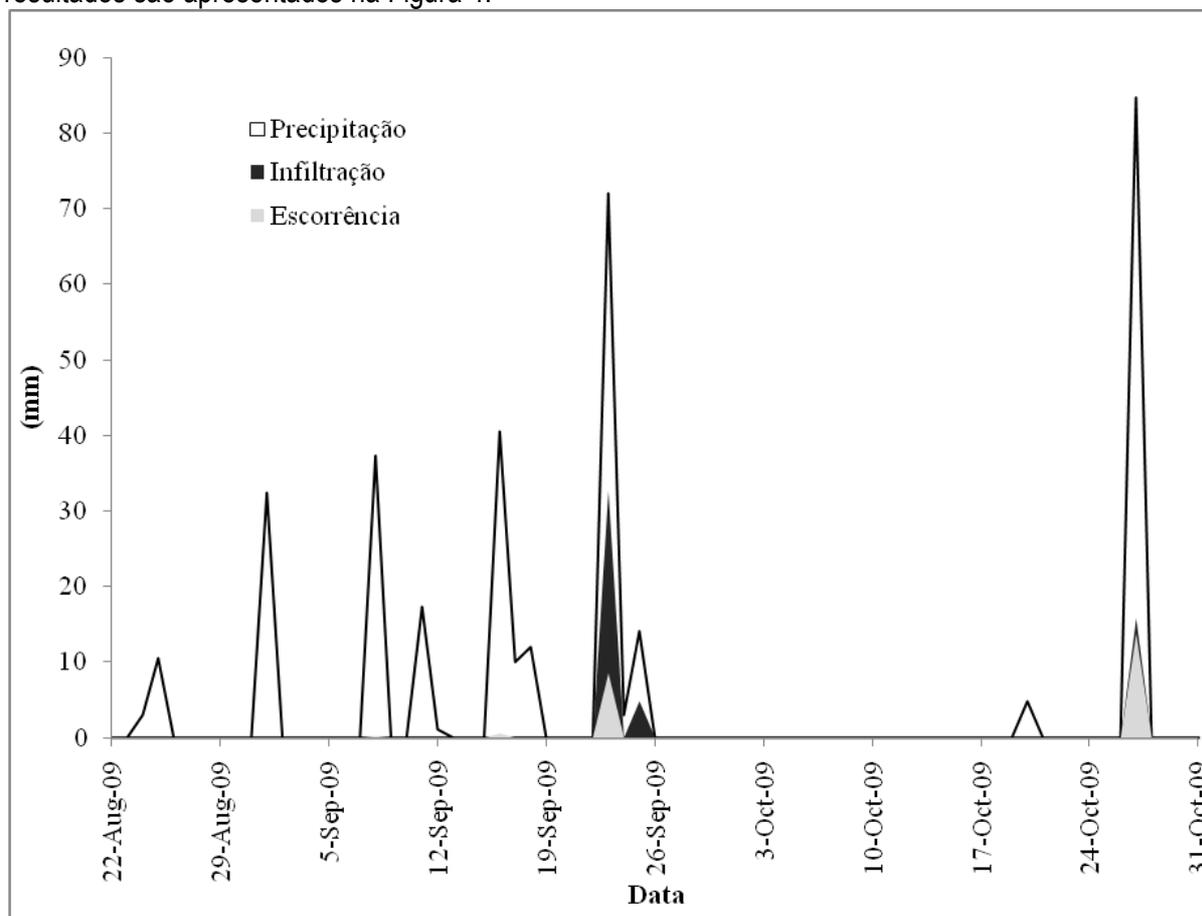


Figura 4 - Distribuição da precipitação diária, infiltração e escoância ao longo do ano de 2009 na estação climatológica da Calheta Monte Vermelho.

Generalizando para toda a ilha, pode dizer-se que no ano de 2009 ocorreu uma precipitação de 294,3 mm, dos quais 22,8 mm escoaram à superfície e 46,5 mm infiltraram-se em profundidade, a que correspondem taxas de 7,0% e 14,1%, respectivamente. Recalculando com base na precipitação média da ilha (124,0 mm) e considerando que os recursos totais correspondem a 23,5% da precipitação, obtêm-se 29,1 mm, ou seja, $7,8 \times 10^6$ m³ anuais, o que equivale a cerca de 21 400 m³/dia.

5.2.1 Recursos hídricos superficiais

Utilizando o valor da precipitação média anual (124,0 mm), obtém-se um valor para o escoamento superficial de 8.7 mm, ou seja, aproximadamente $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Se esta quantidade de água fosse armazenada em albufeiras, através da construção de barragens de retenção, haveria um potencial de água superficial disponível diariamente da ordem dos 6 300 m^3 . No entanto, este valor não constituiria a disponibilidade real pois deverá subtrair-se a quantidade perdida por evaporação ao longo do ano. Esta quantidade depende, não só de parâmetros climáticos como a temperatura, mas também da superfície livre de água, ou seja, da área da albufeira. Nesta perspectiva, as barragens a construir deverão ser instaladas em vales profundos, de modo a minimizar a superfície de água livre e, conseqüentemente, a perda de água por evaporação. Por exemplo se as barragens tivessem características semelhantes às da barragem de Poilão (ilha de Santiago), a superfície de água livre seria de 17 hectares (Gominho, 2007), o que conduziria a uma perda anual por evaporação de 266 000 m^3 , o que equivale a quase 12% dos recursos hídricos superficiais disponíveis em toda a ilha do Maio. Há ainda a considerar a quantidade de água que abandona a albufeira devido à infiltração. Contudo, esta quantidade não deve ser considerada à partida uma perda, uma vez que poderá constituir recarga aquífera e vir a constituir reservas hídricas subterrâneas. Por isso, do ponto de vista hidroclimatológico, afigura-se viável a construção de barragens na ilha do Maio sendo, no entanto, necessário desenvolver estudos de natureza geológica, geomorfológica e hidrogeológica no sentido de selecionar os locais mais favoráveis à implantação das referidas barragens, devendo ser quantificados, com o máximo rigor possível, os aportes hídricos e as perdas de água em cada situação. Tais estudos devem ser desenvolvidos ao nível da bacia hidrográfica e, dentro de cada uma delas, ter em atenção a diversidade geológica, geomorfológica e hidrogeológica que condicionará a seleção do local de implantação das barragens. Ao nível hidroclimatológico seria muito importante dispor de dados pluviométricos da área correspondente ao maciço central da ilha, já que é nesta área que deverão ocorrer as maiores precipitações, as quais, até a data, não são conhecidas.

5.2.2 Recursos hídricos subterrâneos

Os resultados produzidos pelo modelo de balanço hídrico diário mostram que, em média, a infiltração profunda na ilha do Maio é de 14.1% da precipitação, embora se verifique uma grande variabilidade entre os resultados obtidos em cada uma das estações. Considerando este valor médio e a média da precipitação anual, os recursos hídricos subterrâneos são estimados em 17.5 mm, a que corresponde um volume de $4.7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou 12 900 m^3/dia . Esta quantidade de água devidamente explorada proporcionaria a cada habitante da ilha do Maio cerca de 1 900 L/dia. Porém, as captações de água subterrânea nesta ilha distribuem-se predominantemente ao longo da faixa litoral, sendo praticamente inexistentes nas áreas interiores. Além disso, estas captações são exploradas de forma completamente descontrolada, pelo que, na atualidade, cerca de dois terços encontram-se secas. Acresce que, a sua localização em terrenos planos próximos do litoral parece interferir com o equilíbrio da interface água doce/água salgada, tendo conduzido em alguns casos a situações de salinização da água doce

Uma outra metodologia utilizada na estimativa dos recursos hídricos subterrâneos consiste no balanço químico do ião cloreto entre a precipitação e as águas subterrâneas. Pormenores sobre este método e a sua aplicação podem ser consultados, por exemplo, em CUSTÓDIO e LLAMAS (1983). Para a aplicação desta metodologia houve necessidade de colher precipitação, tendo-se utilizado para o efeito os postos udométricos da rede climatológica da ilha de Maio. Durante parte da estação húmida de 2010 foram recolhidas 39 amostras no conjunto das dez estações udométricas. Após as determinações laboratoriais, avaliou-se a concentração média de cloreto na precipitação regional,

tendo-se obtido o valor de 19,3 mg/L. O teor médio de cloretos nas águas subterrâneas é de 175,4 mg/L e foi obtido a partir da média de doze amostras colhidas em diversos pontos da ilha. Para o cálculo da taxa de infiltração profunda utilizou-se ainda um coeficiente de escoamento superficial de 7%, determinado no balanço hídrico sequencial diário. Com base nos valores antes enunciados, obtém-se um coeficiente de infiltração eficaz de 10.2%. Importa referir que este valor constitui uma média para a ilha do Maio, podendo as taxas de infiltração variar de local para local, em função das características dos eventos pluviosos e as características intrínsecas dos solos. O valor médio obtido (10.2%) é inferior ao estimado a partir da execução do balanço hídrico sequencial diário (14.1%). Desta forma, poderá dizer-se que, em média, a infiltração eficaz na ilha do Maio representa entre 10.2% e 14.1% da precipitação. Assim, em ano médio, os recursos hídricos subterrâneos deverão situar-se entre 12.8 mm e 17.7 mm, a que correspondem volumes de $3.44 \times 10^6 \text{ m}^3$ e $4.76 \times 10^6 \text{ m}^3$.

As estimativas das disponibilidades hídricas superficiais e subterrâneas mostram que estas últimas apresentam um potencial superior ao das águas superficiais. Com efeito, como se referiu anteriormente, os recursos hídricos subterrâneos representam cerca de dois terços dos recursos hídricos totais, enquanto as águas superficiais constituem apenas um terço desses recursos. Atendendo a que, em condições naturais, o tempo de permanência das águas no meio subterrâneo é muito superior ao tempo de circulação das águas superficiais, as águas subterrâneas assumem, em termos quantitativos, um papel determinante no contexto das disponibilidades hídricas da ilha do Maio. Por isso, no quadro da gestão integrada dos recursos hídricos desta ilha, as águas subterrâneas deverão constituir fontes privilegiadas de água para o abastecimento domiciliário. No entanto, a sua exploração terá de ser efectuada de forma controlada, evitando situações de sobreexploração que podem conduzir ao avanço da cunha salina em direção ao interior da ilha e a rebaixamentos exagerados, não recuperáveis nos normais ciclos anuais de reposição.

5.3 Escoamento subterrâneo

Os dados piezométricos disponíveis permitem verificar que, em termos gerais, o escoamento subterrâneo se processa de forma radial a partir da zona central da ilha, de acordo com gradientes hidráulicos que variam entre 0.05% e 2.9%. Na zona setentrional da ilha, verifica-se que o gradiente hidráulico assume valores muito baixos, da ordem dos 0.05%. Este facto tem como consequência uma diminuição da inclinação da interface água doce/ água salgada, favorecendo o fenómeno de intrusão salina. A Figura 5 pretende ilustrar a relação entre a água doce e a água salgada na ilha do Maio ao longo de um perfil norte-sul com início em Ponta Cais e terminando junto à foz da Ribeira de Cumiassa. Esta representação, baseada no princípio de Ghijben-Herzberg, poderá não traduzir o comportamento real da interface água doce/água salgada. A sua apresentação cumpre o propósito de mostrar a importância da boa gestão dos recursos hídricos em ambientes insulares.

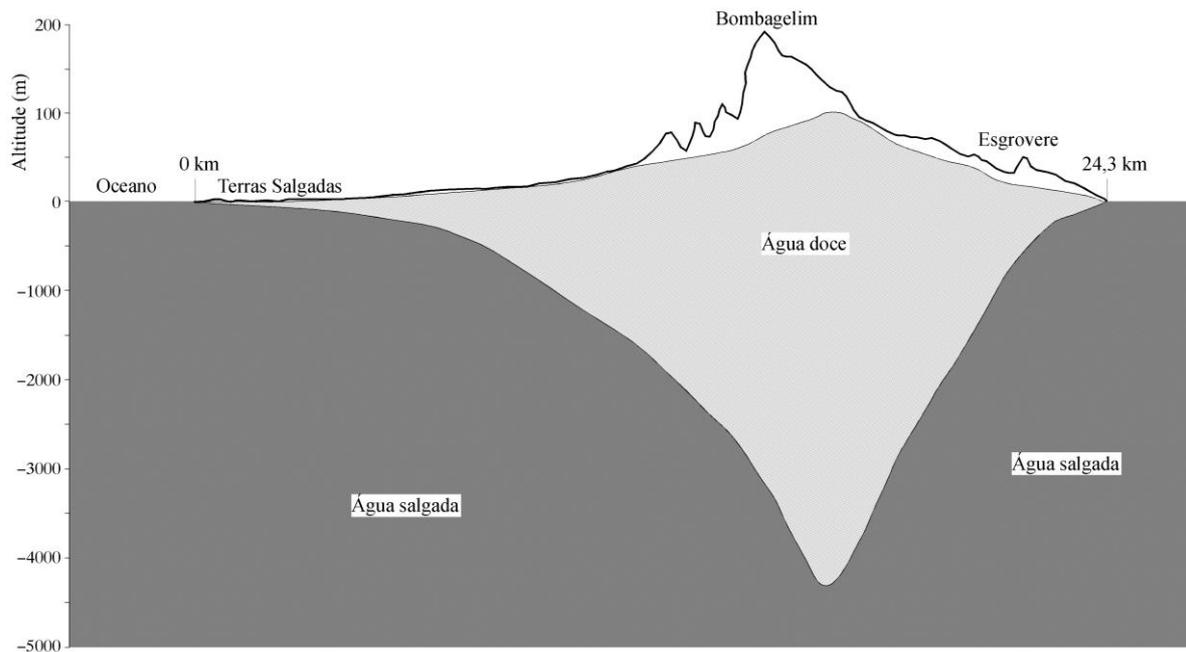


Figura 5 - Configuração provável da interface água doce/água salgada sob a ilha do Maio.

5.4 Hidroquímica

A gestão das águas subterrâneas implica não só um conhecimento quantitativo dos recursos, mas também uma avaliação da qualidade das águas e uma compreensão dos mecanismos mineralizadores. O estudo efetuado baseou-se numa amostragem de dezoito pontos de água, de acordo com a distribuição e a tipologia indicadas na Figura 6.

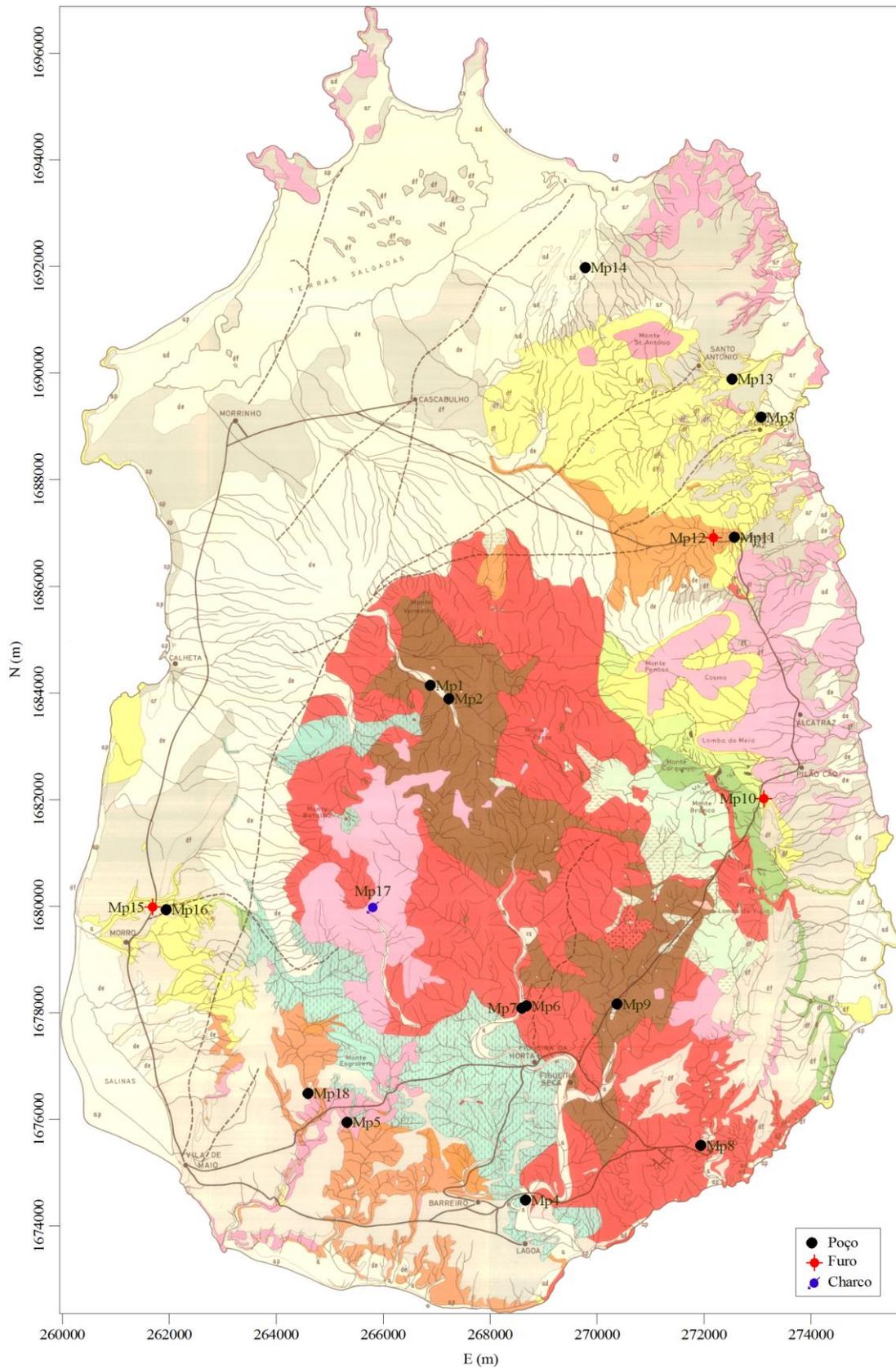


Figura 6 – Localização e tipologia dos pontos de água utilizados neste estudo.

Na Figura 7 apresentam-se os valores de condutividade das amostras analisadas. De um modo geral, trata-se de águas muito mineralizadas, apresentando valores de condutividade entre 832 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mp15) e 7730 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Mp14). Em média, a condutividade eléctrica é de 2232 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

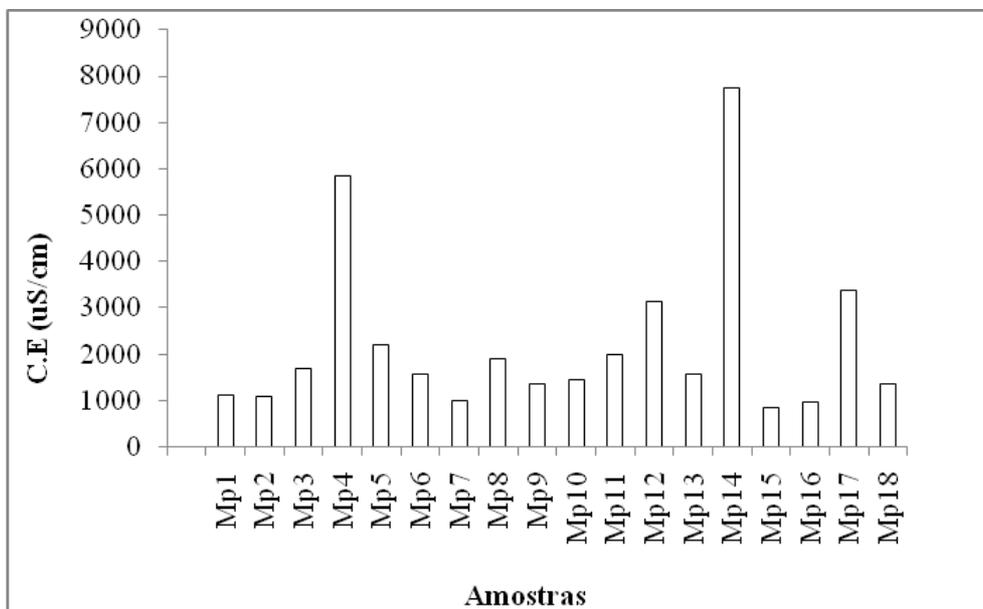


Figura 7– Valores de condutividade eléctrica das amostras de água em estudo.

As águas subterrâneas estudadas são, invariavelmente, alcalinas, com valores de pH compreendidos entre 7,35 e 9,05. O potencial redox indica características oxidantes, com valores de Eh que oscilam entre 176 mV e 259 mV, à exceção da amostra Mp4 que apresenta um valor negativo (-94 mV). Este valor anómalo deverá estar relacionado com o fenómeno de eutrofização que se observa nesse ponto de água (Figura 8).



Figura 8 - Aspecto do fenómeno de eutrofização observado no ponto Mp4.

A Figura 9 mostra as concentrações das amostras em termos dos cátions principais. O sódio é invariavelmente o cátion dominante, seguindo-se o magnésio, o cálcio e, por último, o potássio com concentrações muito inferiores às dos restantes. As amostras Mp14 e Mp4 destacam-se por possuírem os teores mais elevados dos diferentes constituintes catiónicos. Particular destaque merece a amostra Mp14, onde o sódio atinge um teor excepcionalmente elevado (48.74 meq/L), sendo mais de duas vezes superior ao da segunda amostra mais mineralizada neste elemento (23.41 meq/L).

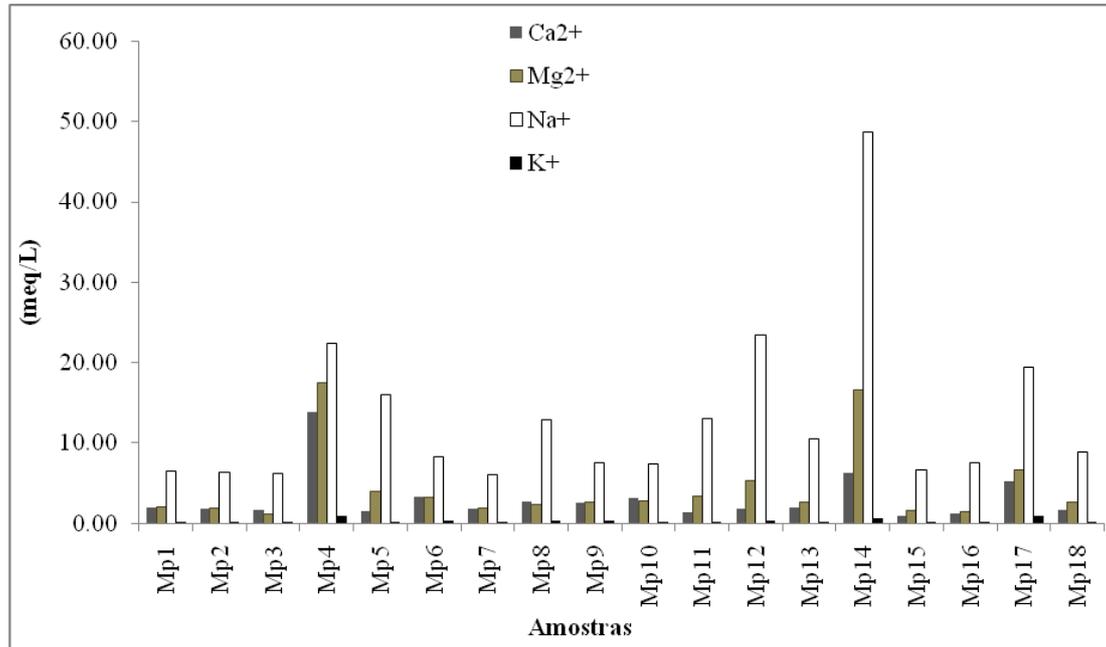


Figura 9 - Concentrações dos cátions nas amostras de água colhidas na ilha do Maio.

As concentrações de cloreto, bicarbonato, sulfato e nitrato apresentam-se graficamente na Figura 10.

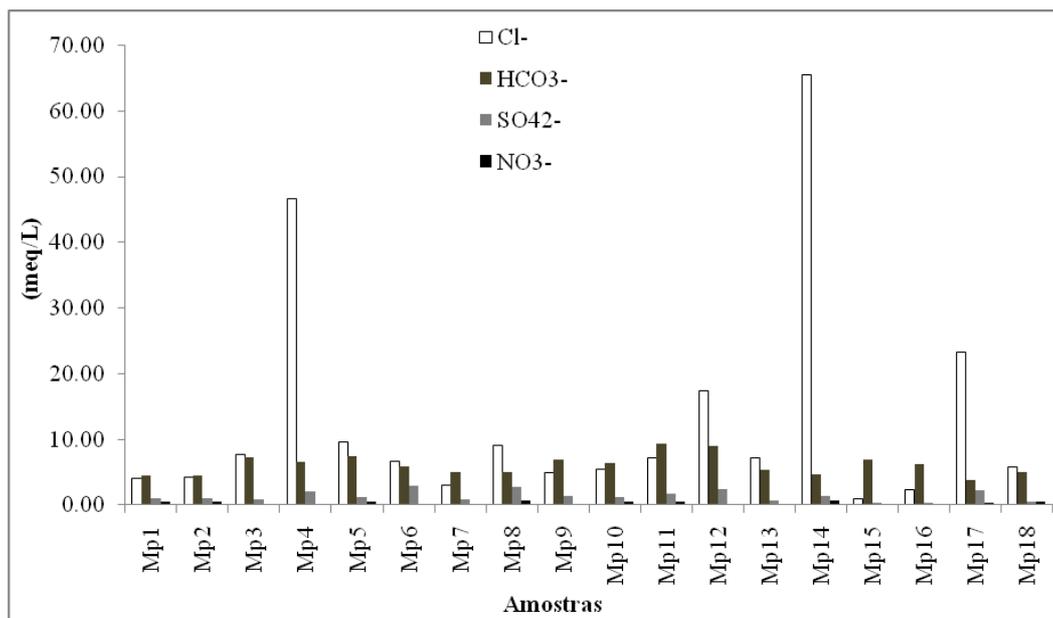


Figura 10 - Concentrações dos aniões nas amostras de água colhidas na ilha do Maio.

O cloreto surge como anião dominante em 10 amostras, atingindo concentrações anormalmente elevadas nas amostras dos pontos Mp14 e Mp4 e, em menor escala, nos pontos Mp17 e Mp12. Nos dois primeiros casos, os teores são superiores a 40 meq/L, atingindo 65.53 meq/L em Mp14; Mp17 e Mp12 apresentam concentrações de 23.33 meq/L e 17.46 meq/L, respectivamente. Nas restantes 14 amostras os teores de cloreto são inferiores a 10 meq/L. Em 8 amostras, o bicarbonato é o anião dominante, mas as suas concentrações máximas são muito inferiores às de cloreto das amostras mais mineralizadas. De facto, a concentração máxima de bicarbonato ocorre na amostra Mp11 com um teor de 9.29 meq/L. O sulfato surge como o terceiro mineralizador aniónico das amostras em estudo, embora com concentrações muito inferiores às do cloreto e do bicarbonato. Finalmente, o nitrato apresenta concentrações ainda mais baixas que o sulfato e, devido ao efeito de escala tem uma expressão gráfica quase imperceptível (Figura 10).

Embora surgindo em baixas concentrações, o carbonato e o nitrito são incluídos na componente maioritária das águas em estudo (Figura 11). Devido ao pH destas águas, o carbonato surge apenas na amostra Mp16 com uma concentração de 0.37 meq/L. Pelo contrário, o nitrito está apenas virtualmente ausente em 5 amostras. Nas restantes, surge em concentrações que variam entre 0.01 meq/L e 0.9 meq/L. Este valor máximo constitui um caso excepcional no contexto das águas analisadas e corresponde à água do ponto Mp4. Como se viu anteriormente, o potencial redox desta água (-94 mV) é também uma situação excepcional e explica o teor elevado de nitrito. De facto, o carácter redutor desta água proporciona a ocorrência de espécies reduzidas de azoto, como o nitrito. Repare-se que a concentração de nitrato nesta água, não obstante a sua elevada mineralização, é relativamente baixa (0.14 meq/L).

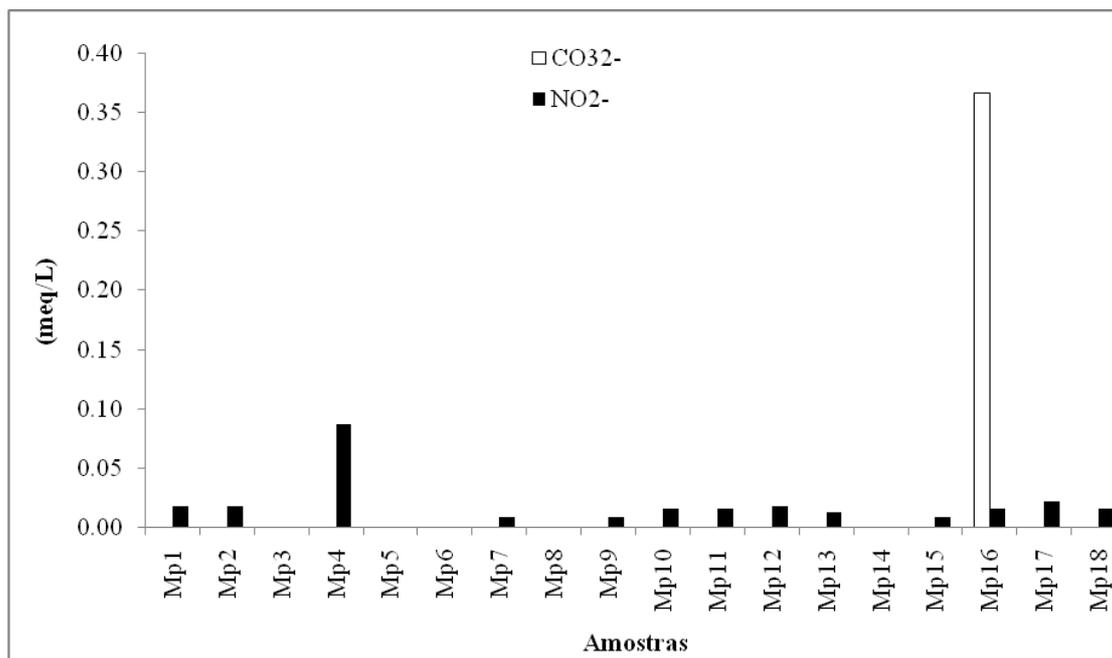


Figura 11 - Concentrações de CO₃²⁻ e o NO₂⁻ nas amostras de água colhidas na ilha do Maio.

A mineralização das águas subterrâneas em estudo é essencialmente controlada pelo ião cloreto, o que atesta a influência direta ou indireta da água do mar no processo de aquisição de sais das referidas águas subterrâneas. Como se observa na Figura 12, a correlação existente entre a condutividade eléctrica das águas e o teor de cloreto é bastante significativa e traduz-se por uma equação de regressão com uma inclinação um pouco inferior à média das águas oceânicas. Este facto

sugere que, além da influência marinha, a mineralização das águas subterrâneas é obtida também por outros processos, nomeadamente a interação água/rocha.

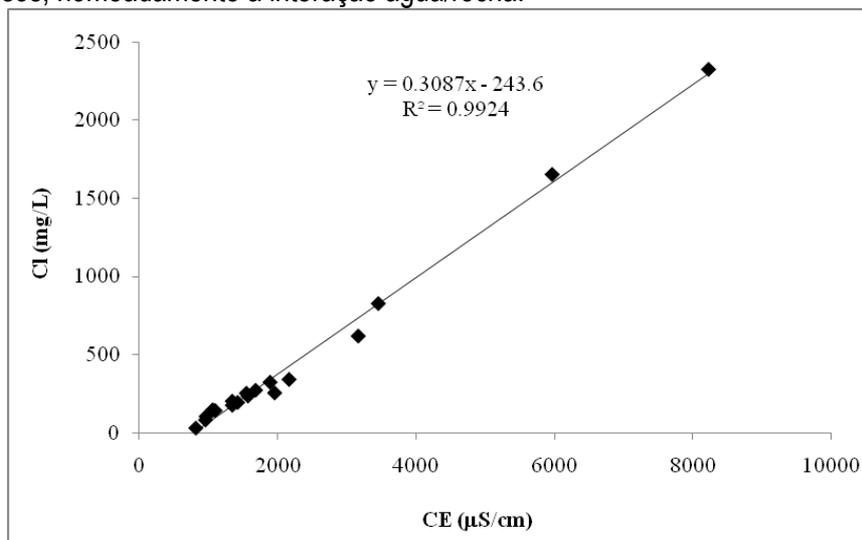


Figura 12 - Diagrama de dispersão da concentração do cloreto e da condutividade eléctrica.

Além da análise aos constituintes maiores das águas, foram também efectuadas determinações de constituintes menores e vestigiais. A pesquisa efectuada a alguns destes elementos não permitiu a sua detecção e/ou a sua quantificação na maioria das amostras, pelo que, serão considerados apenas os elementos que registaram teores mensuráveis na quase totalidade das amostras analisadas. No Quadro 1 apresenta-se uma síntese estatística dos teores dos elementos antes referidos nas águas subterrâneas da ilha do Maio.

Quadro 1 - Parâmetros estatísticos relativos a alguns elementos vestigiais (valores em µg/L).

Elemento	Mínimo	Máximo	Média	D. P.	C. V.
Estrôncio (Sr)	270	6300	1221.1	1588.7	1.300988
Vanádio (V)	<0.1	90	30.329	20.421	0.673313
Alumínio (Al)	4	34	15.278	8.4492	0.553038
Escândio (Sc)	4	6.0	5	0.686	0.137199
Titânio (Ti)	2.7	5.40	3.6778	0.6274	0.170584
Manganês (Mn)	0.5	2420	140.33	569	4.054817
Níquel (Ni)	0.3	12.20	1.3833	2.7421	1.982242
Cobre (Cu)	<0.2	17.60	4.0765	4.9877	1.223528
Zinco (Zn)	1.8	49.20	10.1	10.985	1.087594
Arsénio (As)	< 0.03	3.53	0.9871	0.7229	0.732378
Selénio (Se)	2.8	26.80	9.1556	6.1464	0.671327
Bromo (Br)	370	13300	2433.3	3241.4	1.332131
Rubídio (Rb)	0.54	17.40	3.7988	3.9417	1.037596
Ítrio (Y)	0.011	0.06	0.0355	0.0149	0.419737
Molibdénio (Mo)	0.9	17.40	6.5667	4.9981	0.761135
Iodo (I)	30	104	66.889	21.557	0.322277
Bário (Ba)	0.7	382	59.983	97.599	1.627102
Lantânio (La)	0.008	0.09	0.0348	0.0216	0.621383
Cério (Ce)	0.016	0.19	0.0831	0.0489	0.588229
Praseodímio (Pr)	0.002	0.02	0.0087	0.0053	0.608966
Neodímio (Nd)	0.008	0.08	0.0356	0.021	0.591626
Samário (Sm)	0.001	0.02	0.0076	0.0053	0.696247

Európio (Eu)	<0.001	0.02	0.0047	0.0042	0.897686
Gadolínio (Gd)	0.002	0.02	0.0071	0.0042	0.594451
Chumbo (Pb)	0.05	0.93	0.2444	0.2124	0.868972
Urânio (U)	0.113	1.78	0.7134	0.4426	0.620374

Como se observa no Quadro 1, o bromo é o elemento vestigial mais abundante nas águas em estudo, atingindo um valor de máximo de 13300 µg/L e uma média de 2433.3 µg/L. O segundo elemento mais abundante nas águas é o estrôncio, com um valor máximo de 6300 µg/L, e com uma média de 1221.1 µg/L. Segue-se o manganês, com um valor máximo de 2420 µg/L, apresentando uma média de 140.33 µg/L. O elemento vestigial que apresenta menor abundância nas águas analisadas é o európio, apresentando um valor mínimo inferior a 0.001 µg/L e uma média de 0.0047 µg/L. Segue-se o samário, com um valor mínimo de 0.001 µg/L. De seguida está o gadolínio e o praseodímio, ambos com um valor mínimo de 0.002 µg/L.

A Figura 13 representa a projeção dos dados das amostras de águas subterrâneas recolhidas na ilha do Maio. Em termos catiónicos, as águas subterrâneas em estudo podem ser classificadas como sódicas, embora a amostra Mp4 se afaste um pouco do polo sódico-potássio. No que respeita aos aniões, é maior a dispersão de dados, estando as amostras essencialmente distribuídas entre os polos cloretado e bicarbonatado. A maioria das amostras pode ser considerada cloretada-bicarbonatada sódica.

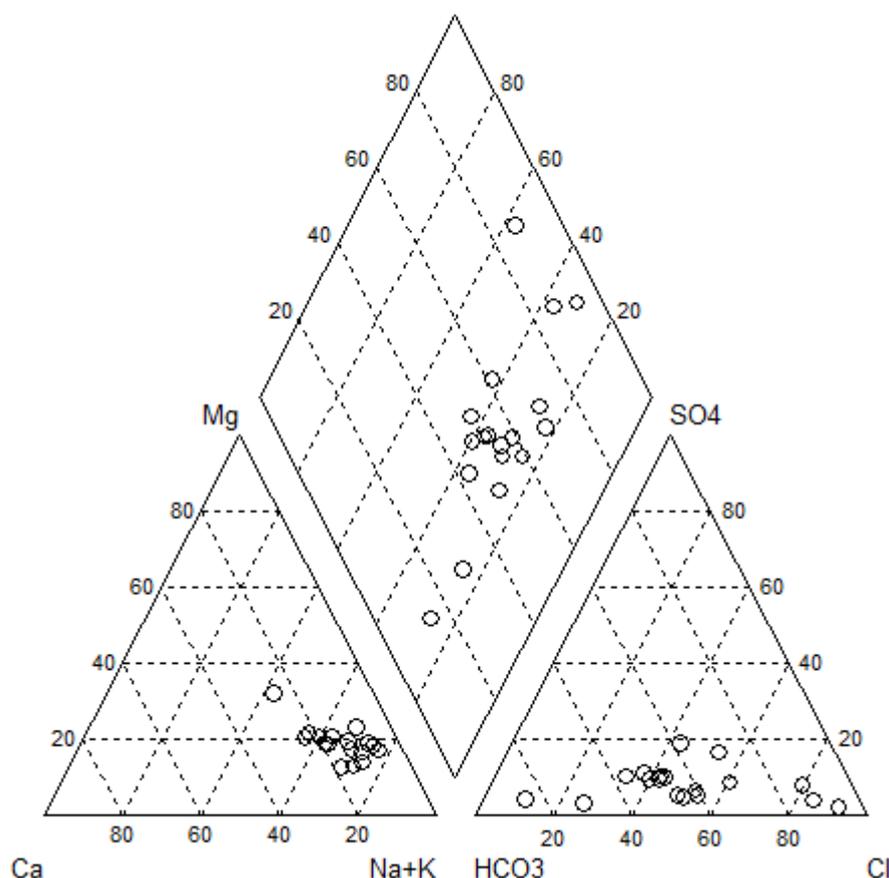


Figura 13 - Diagrama de Piper das amostras em estudo.

5.5 Qualidade da água

O conceito de qualidade da água deve ser encarado numa perspectiva da sua utilização. Assim, as exigências de uma água para consumo humano serão distintas dos requisitos das águas para uso industrial ou para rega. Neste trabalho, avalia-se a qualidade das águas subterrâneas da ilha de Maio em relação à sua possível utilização no consumo humano e para uso agrícola.

5.5.1 Qualidade da água para consumo humano

A qualidade da água para consumo humano é determinada em documentos legais elaborados, tanto a nível nacional como internacional. Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto estabelece o regime da qualidade da água destinada ao consumo humano. Neste diploma legal são estabelecidos valores paramétricos, ou seja, valores máximos ou mínimos fixados para cada um dos parâmetros a controlar.

Analisando os parâmetros que tornam algumas águas subterrâneas em estudo impróprias para o consumo humano, verifica-se que o nitrito é o principal responsável por este fenómeno, já que o valor paramétrico é ultrapassado em dez amostras, ou seja, em 55% do conjunto considerado (Figura 14). Dos 22 parâmetros considerados, observa-se que, em metade destes parâmetros, nenhuma das amostras regista teores superiores aos respectivos valores paramétricos.

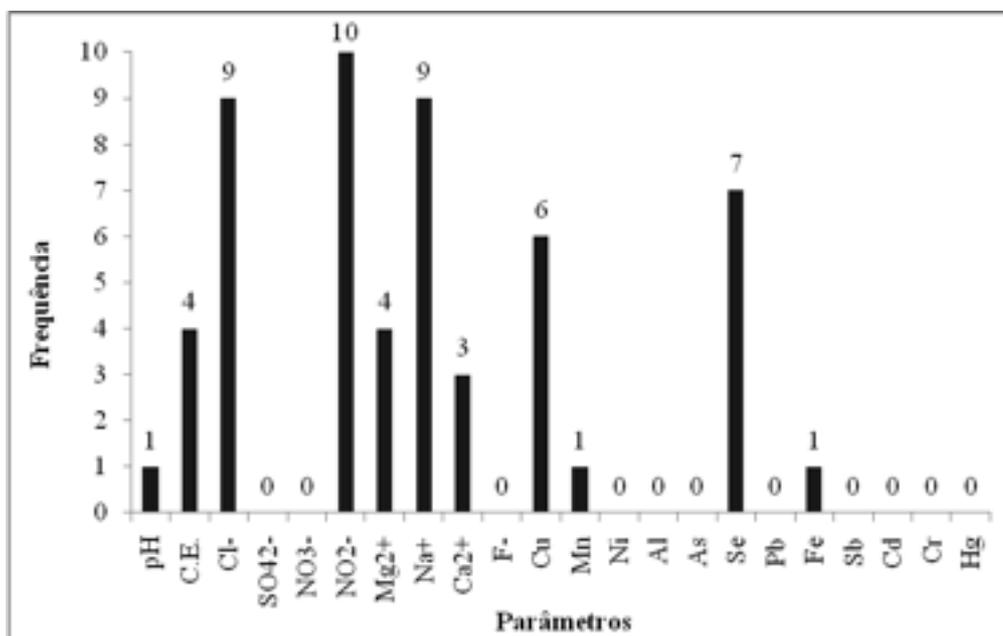


Figura 14 – Número de amostras que ultrapassam os valores paramétricos definidos no Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto.

Entre as águas subterrâneas em estudo, a amostra relativa ao ponto Mp4 é a que apresenta o maior incumprimento nos critérios de avaliação da água para o consumo humano (Figura 15). A amostra Mp17 ultrapassa os limites legais em nove parâmetros, seguindo-se as amostras Mp14 e Mp12, que ultrapassam os valores paramétricos em sete e seis parâmetros, respectivamente. A amostra relativamente ao ponto Mp5 não cumpre os valores paramétricos em quatro dos vinte e dois parâmetros considerados. Ultrapassam os limites legais em três parâmetros, as amostras Mp8, Mp11, Mp13 e Mp18. As amostras Mp2 e Mp10 excedem os valores paramétricos em dois parâmetros. Com apenas incumprimento em um parâmetro estão as amostra Mp1, Mp3 e Mp16. Finalmente, as amostras relativas aos pontos Mp6, Mp7, Mp9 e Mp15 cumprem integralmente os critérios de âmbito físico-

químico utilizados na avaliação da qualidade das águas subterrâneas da ilha do Maio no que respeita à sua eventual utilização para o consumo humano.

Em síntese, admitindo que a amostragem efetuada tem significado estatístico, poderá dizer-se que, a nível físico-químico, cerca de 20% das águas subterrâneas são próprias para o consumo humano. Contudo, importa enfatizar a necessidade de avaliar a qualidade microbiológica destas águas, atendendo às deficientes condições de salubridade em que se encontram as captações de água subterrânea, à exceção dos furos visitados.

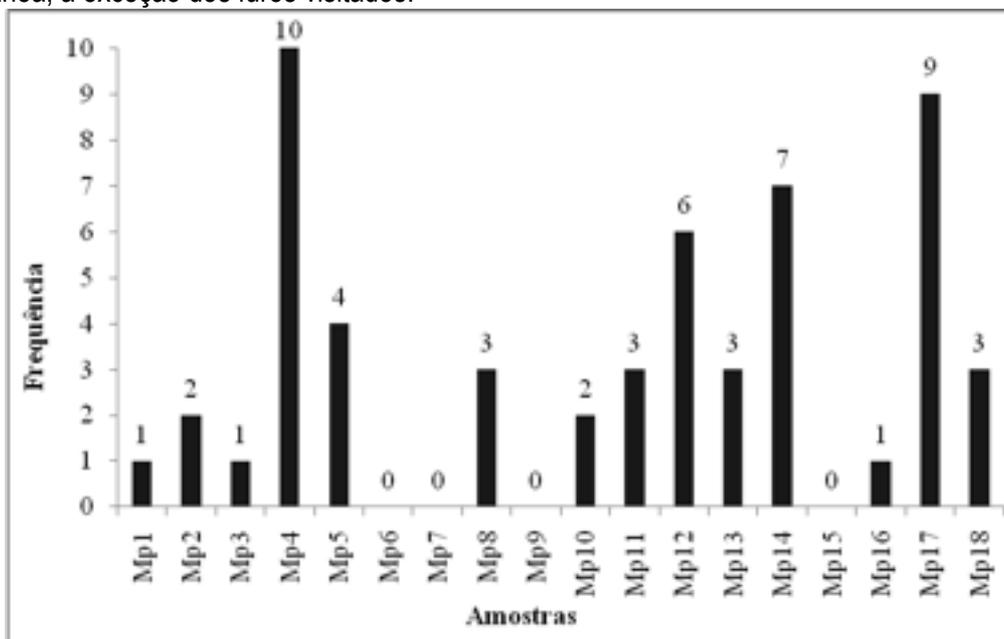


Figura 15 – Número de parâmetros que excedem os valores paramétricos em cada uma das amostras.

5.5.2 Qualidade da água para rega

Em relação à qualidade das águas para rega, os critérios de classificação dependem do tipo de planta, do volume de rega, da qualidade do solo e do clima local (DAVIS E DE WIEST, 1971). Existem várias classificações para as águas destinadas a rega. Uma das mais utilizadas é do “U.S. Salinity Laboratory Staff” que se baseia na salinidade das águas, avaliada através da condutividade eléctrica, e na concentração do sódio em relação ao cálcio e ao magnésio, através de um parâmetro designado “taxa de adsorção de sódio”. Na Figura 16 estão projetados os pontos das amostras analisadas, em função destes dois parâmetros. As amostras Mp4 e Mp14 não estão incluídas na figura, pelo facto dos seus valores de condutividade eléctrica ultrapassarem o limite superior da escala do diagrama. Contudo, pode dizer-se que o perigo de alcalinização das amostras Mp4 e Mp14 é baixo e médio, respectivamente. O perigo de salinização é, naturalmente, extremamente elevado. Como se observa na Figura 16, os pontos representativos das restantes amostras de águas subterrâneas distribuem-se por quatro sectores (C3S1, C3S2, C3S3 e C4S3) com o seguinte significado (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983):

C3 – água altamente salina, com condutividade eléctrica entre 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, correspondendo aproximadamente à gama de 480 mg/L e a 1440 mg/L de mineralização total. As águas incluídas nesta classe não podem ser utilizadas em solos com drenagem deficiente e as culturas terão de ser muito tolerante à salinidade;

C4 – água extremamente salina, com condutividade eléctrica superior a 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, As águas com esta característica não são apropriadas para rega. No entanto, em solos muito permeáveis e com culturas extremamente tolerantes poderão ser utilizadas com precaução;

S1 – água com baixa concentração de sódio, podendo ser utilizada na maioria dos solos, visto que, por apresentam baixas possibilidades de atingir valores elevados de concentrações de sódio por troca iónica. No entanto, as culturas sensíveis podem armazenar quantidades prejudiciais de sódio;

S2 – água com concentração moderada de sódio podendo representar um perigo em solos de drenagem deficiente e de textura fina, com elevada capacidade de troca catiónica;

S3 – água com alta concentração de sódio, podendo atingir o limite de toxicidade por sódio em solos mal drenados.

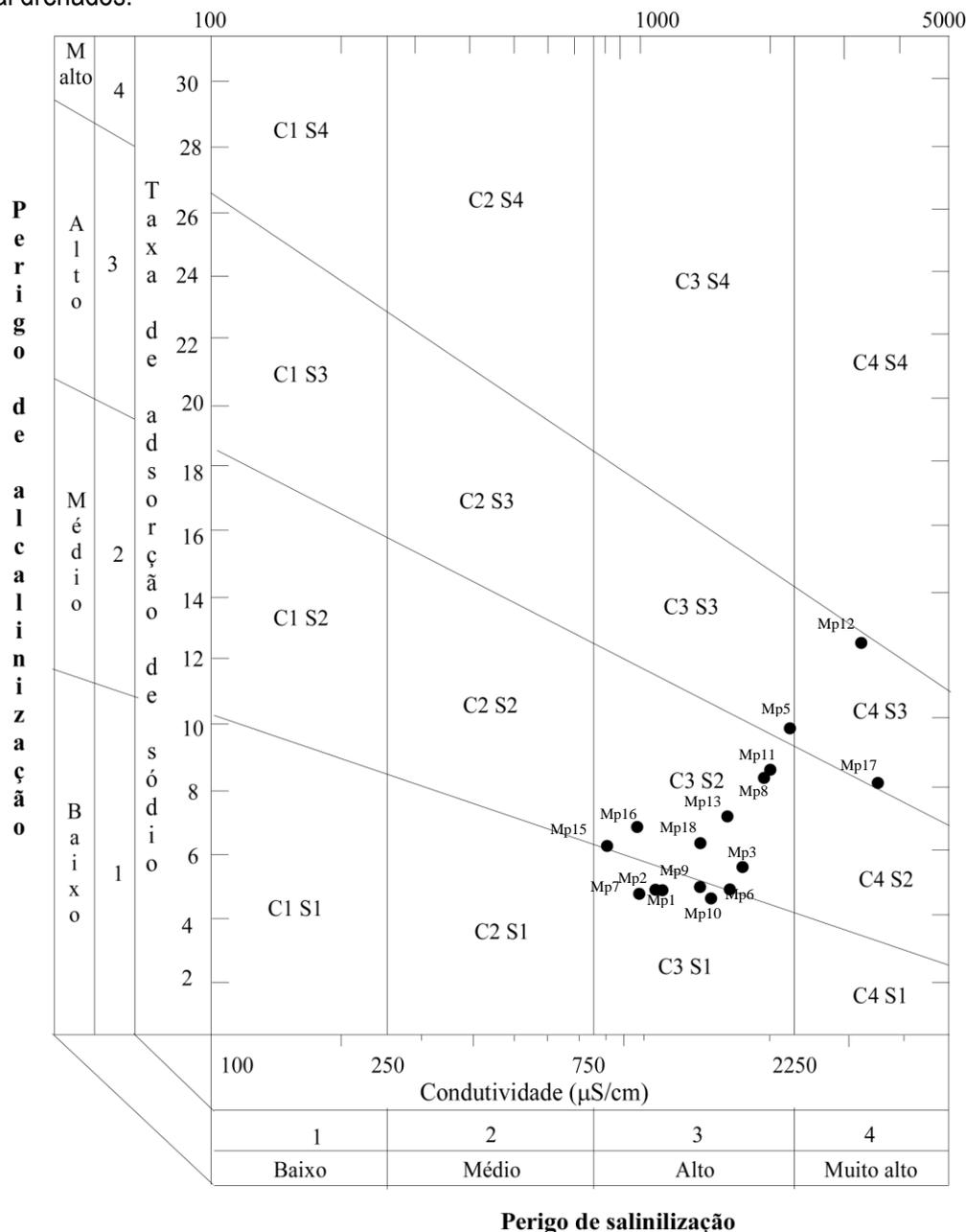


Figura 16 - Qualidade química das águas para rega.

Em síntese, conclui-se que as águas analisadas apresentam baixo a alto perigo de alcalinização do solo e alto a muito alto perigo de salinização, pelo que não são adequadas para rega, exceto de culturas muito resistentes aos sais.

6. CONCLUSÕES

Em face do exposto, pode concluir-se que, não obstante o carácter árido da ilha do Maio, a mesma apresenta um potencial de recursos hídricos não negligenciável, eventualmente suficiente para suprir as necessidades hídricas da população. Os modelos utilizados na avaliação dos recursos hídricos mostram que as águas subterrâneas assumem um papel mais importante que as águas superficiais, embora ocorra uma variabilidade espacial relacionada essencialmente com as características dos solos. A exploração dos recursos hídricos subterrâneos tem sido feita através de poços de grande diâmetro e, mais raramente, por meio de furos verticais. A generalidade das captações está situada preferencialmente em terrenos de cotas baixas, em alguns casos muito próximos do litoral. Em termos de qualidade, não obstante a elevada mineralização das amostras de água recolhidas, considera-se a existência de águas subterrâneas que poderão ser utilizadas na rega e mesmo, em alguns casos, no consumo humano.

Numa perspetiva de gestão das águas subterrâneas, importa salientar a necessidade de inverter a situação atual, devendo desenvolver-se programas de pesquisa e eventual exploração de águas subterrâneas na zona relativa ao maciço central, não só por razões de ordem quantitativa, mas também em termos de qualidade das águas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito das atividades do Centro de Investigação Geológica, Ordenamento e Valorização de Recursos da Universidade do Minho, apoiadas pelo programa plurianual da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, financiado por verbas da União Europeia (Fundos Estruturais – FEDER) e do Orçamento Geral do Estado.

Os autores agradecem a colaboração do grupo de trabalho do Doutor Alberto Mota Gomes na colheita das amostras de água. Agradecimentos especiais são devidos ao Sr. Carlos Dias, Delegado do Ministério do Ambiente, do Desenvolvimento Rural e dos Recursos Marinhos na ilha do Maio.

BIBLIOGRAFIA

- ALI, M. Y., WATTS, A. B.; HILL, I. (2003). A Seismic Reflection Profile Study of Lithospheric Flexure in the Vicinity of the Cape Verde Island. *J. Geophys. Res.*, **108** (B5), 2239, doi: 10.1029/2002JB002155.
- AMARAL, I. (1964). *Santiago de Cabo Verde.- A Terra e os Homens*. Junta de Investigação do Ultramar, Lisboa, 1964, pp. 78-145.
- BEBIANO, J. B. (1932). *A Geologia do Arquipélago de Cabo Verde*. Oficina Gráfica, Lda., Lisboa, 275 pp.

- BURKE, K.; WILSON, J.T. (1972). Is the African Plate Stationary?, *Nature*, **239**, pp. 387-390.
- CANAS, A.; LIMA, A.S.; FONSECA, J. (2003). Quantificação dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Região de Montalegre (Norte de Portugal). *Ciências da Terra*, Volume Especial V, PP. 62-63. Publicação do artigo completo em CD-ROM.
- CROUGH, S. T. (1978). Thermal origin of mid-plate hot-spot swells. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **55**, 2, pp. 451-469.
- CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. (1983) – *Hidrologia Subterranea*. 2ª ed., Ed. Omega, 2 vols., 2359 p.
- DAVIS, S.N.; DE WIEST, R. (1971). *Hidrogeologia*. Ed. Ariel, Barcelona, 563 pp.
- FARIA, F. X. (1987) – *Os solos da ilha do Maio*. Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa, 87 pp.
- GARCIA, E. O. (2010). *Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Ilha do Maio (Cabo Verde): o Contributo das Águas Subterrâneas*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Braga, 140 pp.
- GOMINHO, M. F. A. (2007). Identificação da rede de monitorização da quantidade de água da bacia hidrográfica da Ribeira Seca - Cabo Verde. Princípios e monitorização. *Actas do VIII SILUSBA*, 15 pp.
- INGRH (2000) - *Visão Nacional sobre a Água, a Vida e o Ambiente no Horizonte*. Instituto Nacional de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, Praia.
- LERNER, D. N.; ISSAR, A. S.; SIMMERS, I. (1990). *Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge*. International Contributions to Hydrogeology, I. A. H., Verlag Heinz Heise, 345 pp.
- MOTA GOMES, A. (2007). *Hidrogeologia e recursos hídricos da ilha de Santiago (Cabo Verde)*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 296 pp.
- PIM, J.; PEIRCE, C.; WATTS, A. B.; GREVEMEYER, I.; KRABBENHOEFT, A. (2008). Crustal Structure and Origin of the Cape Verde Rise. *Earth and Planetary Science Letters*, **272**, pp. 422-428.
- PINA, A. F. L. (2009). *Hidrogeoquímica e qualidade das águas subterrâneas da ilha de Santiago - Cabo Verde*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 232 pp.
- STILLMAN, C. J.; FURNES, H.; LESBAS, M. J.; ROBERTSON A. H. F.; ZEILONKA J. - (1982). The Geological History of Maio, Cape Verde Islands. *Journal of the Geological Society*, **139**, 3, pp. 347-361.
- STRAHLER A. N.; STRAHLER A. H. (1989). *Geografia Física*. Ediciones Omega, S.A., Barcelona, 550 pp.